心理科学进展 2019, Vol. 27, No. 2, 201–208
Advances in Psychological Science DOI: 10.3724/SP.J.1042.2019.00201

·研究前沿(Regular Articles)·

发展性阅读障碍的噪音抑制缺陷*

季雨竹 毕鸿燕

(中国科学院心理研究所, 中国科学院行为科学重点实验室, 脑科学与学习困难研究中心, 北京 100101)
(中国科学院大学心理系, 北京 100049)

摘 要 发展性阅读障碍的缺陷本质一直是研究者们关注和争论的焦点。近些年, 有研究者提出了一种新的理论假设——噪音抑制缺陷假设, 并得到了许多研究证据的支持。这种缺陷在视觉和听觉通道中均存在, 说明阅读障碍具有多感觉/一般性噪音抑制缺陷。但也有研究者指出知觉噪音抑制本质上反映了注意的功能, 因而这种缺陷可能是由注意缺陷导致的。目前还缺乏直接证据支持汉语阅读障碍存在噪音抑制缺陷。最后本文对该领域未来的发展方向做出展望。

关键词 发展性阅读障碍; 噪音抑制; 视觉大细胞-背侧通路; 注意
分类号 B842; B844

发展性阅读障碍(Developmental dyslexia, DD)是一种在获得阅读技能方面的特殊困难, 这种困难并不能单纯地归因于智力水平、视敏度问题和教育缺失(World Health Organization, 2011)。关于发展性阅读障碍的核心缺陷, 目前拼音文字的研究较一致地认为语音缺陷是其核心缺陷, 即 DD 存在语音表征、存储和提取缺陷, 这一缺陷影响了形音转换过程, 最终导致其阅读能力受损(Snowling, 2001)。但有研究者指出, 语音缺陷只是阅读障碍的一种表现, 其背后有更基础的一般感知觉缺陷, 包括快速听觉加工缺陷(Tallal, 2004), 视觉大细胞-背侧通路缺陷(Stein, 2001, 2014; Stein & Walsh, 1997)和小脑缺陷(Nicolson, Fawcett, & Dean, 2001)等。近些年, 视觉大细胞-背侧通路缺陷理论逐渐成为了阅读障碍领域主流的理论观点之一, 大量的神经科学研究的确发现了阅读障碍个体存在大细胞通路功能的异常(e.g. Boets, Vandermosten, Cornelissen, Wouters, & Ghesquière, 2011; Gori, Cecchini, Bigoni, Molteni, & Facoetti, 2014; Stein, 2001), 然而也有研究者对该理论提出了质疑。首先, 一些研究没有发现 DD 在大细胞通路条件下表现出对比度敏感性的低下, 还有一些研究则发现不论是大细胞条件还是小细胞条件 DD 都存在较低的对比度敏感性, 暗示着一种普遍的缺陷(Skottun, 2000)。其次, 以往发现了 DD 存在大细胞通路缺陷的研究所使用的刺激材料均是在高噪音的情况下(Sperling, Lu, Manis, & Seidenberg, 2005, 2006a)。因此 Sperling 等(2005)基于信号-噪音辨别(signal-noise discrimination)的相关理论, 首次提出了阅读障碍的噪音抑制缺陷假设(noise exclusion deficit hypothesis), 并通过系列实验证明了这一观点。随后噪音抑制缺陷假设得到了许多研究证据的支持(Conlon, Lilleskaret, Wright, & Power, 2012; Northway, Manahilov, & Simpson, 2010; Sperling et al., 2006a; Sperling, Lu, Manis, & Seidenberg, 2006b), 并且研究者们发现这种缺陷并非只局限于视觉通道, DD 同样表现出了听觉通道的噪音抑制缺陷(Calcus, Deltenre, Colin, & Kolinsky, 2017; Chait et al., 2007; Dole, Hoen, & Meunier, 2012; Partanen et al., 2012; Ziegler, Pech-Georgel, George, & Lorenzi, 2009), 支持了多感觉/一般性的噪音抑制缺陷。这一缺陷的神经生理学基础可能与不理想的神经元选择性

收稿日期: 2018-04-09
* 国家自然科学基金面上项目(31671155; 31371044)资助。
通信作者: 毕鸿燕, E-mail: bihy@psych.ac.cn

(tuning of neurons)、皮质 γ-氨基丁酸(GABA)的活动异常和皮层网络的神经噪音(neural noise)有关(Hancock, Pugh, & Hoeft, 2017; Sperling et al., 2006a; Winterer & Weinberger, 2004)。然而，有研究者指出知觉噪音抑制本质上反映了注意的功能，因而阅读障碍所表现出的噪音抑制缺陷可能是由注意缺陷导致的(Facoetti, Ruffino, Peru, Paganoni, & Chelazzi, 2008)；还有一些研究者认为这种缺陷可能并非是导致阅读障碍的原因，而是其结果(Calcus et al., 2017)。

本文将系统回顾近十几年噪音抑制缺陷假设的相关研究，分别从视觉通道的研究、听觉通道的研究、噪音抑制与注意的关系、汉语研究这几个方面进行综述，并在最后对该领域未来的发展方向进行了展望。

1 视觉通道的研究

噪音抑制缺陷假设认为阅读障碍在排除不相关噪音方面存在困难，于是他们在包含噪音的视觉环境下加工相关信息时就表现出缺陷。Sperling 等(2005)首先使用光栅觉察任务，对阅读障碍的噪音抑制能力进行了考察。实验包含两种刺激，一种是大细胞通路敏感的光栅，具有低空间分辨率和高时间分辨率，另一种是小细胞通路敏感的光栅，具有高空间分辨率和低时间分辨率。刺激的呈现方式包含无噪音和高噪音两种条件，在无噪音条件下屏幕上只呈现光栅，而在高噪音条件下光栅出现的同时伴随对比度呈高斯分布的噪音。结果发现不论是大细胞通路敏感的刺激还是小细胞通路敏感的刺激，只要在高噪音条件下阅读障碍者就表现出更差的对比度敏感性；而在无噪音的两种条件下，阅读障碍的对比度敏感性与对照组没有显著性差异，表明阅读障碍者存在噪音抑制缺陷，而非大细胞通路缺陷。随后 Sperling 等(2006a)又采用一致性运动任务对这一假设进行检验。一致性运动是通过随机运动点图谱(random dot kinematogram, RDK)产生的，其中一部分点是信号点，包含运动方向信息，其余的则为噪音点，整体的运动方向需要通过整合信号点的运动信息获得。该任务通常被用来考察个体背侧通路视觉运动区(V5/MT)的功能，以往研究发现 DD 在这个任务中的表现较差，反映了其视觉背侧通路功能缺陷(e.g. Conlon, Sanders, & Zapart, 2004; Talcott et al., 2003)。然而，Sperling 等人(2006a)认为这些研究所采用的范式都属于高噪音条件(信号点和噪音点的对比度一致)，所以 DD 较差的表现可能是由于其噪音抑制能力弱导致的，而非视觉运动加工的缺陷。于是他们在此基础上又加入了低噪音条件，即噪音点为灰色而信号点为红色。结果发现，尽管两组的一致性运动阈值都降低了，但是组间差异消失了。研究者认为在这种条件下 DD 能够最优化知觉过滤(perceptual filters)，可以从灰色的噪音点中选择性地知觉到红色信号点，从而判断一致性运动方向，因此 DD 的问题与运动无关，而是和噪音有关。但是该研究中低噪音条件下信号点为红色，这可能会引入颜色这一混淆变量(小细胞通路敏感条件)。Conlon 等(2012)进一步系统地操控了信号点和噪音点的对比度，设置了信号对比度低于噪音条件(信号为灰色，噪音为黑色)，信号对比度和噪音一致条件(包含两种情况：信号和噪音均为灰色或黑色)，以及信号对比度高于噪音条件(信号为黑色，噪音为灰色)。结果发现在前两种条件下 DD 组均表现出了较高的一致性运动阈限，但在高信号对比度(即低噪音)条件下两组被试的阈限没有显著性差异，这与 Sperling 等人(2006a)的研究结果一致，进一步表明 DD 存在噪音抑制缺陷。

有研究者用其他的实验范式检验这一假设。Northway 等(2010)用符号辨别任务测量被试的对比度阈限，结果同样发现在高噪音条件下 DD 的对比度阈值高于对照组，而在无噪音条件下两组阈值没有显著性差异。Sperling 等(2006b)使用轮廓幻影范式对 DD 儿童的视觉快速加工能力进行了考察。实验要求被试判断不断交替闪现的点阵图中是否出现了目标图形，并采用阶梯法测量被试的时间分辨率阈限。结果发现，在黑白点阵条件下，DD 组的表现均差于对照组，而在彩色点阵条件下，两组表现无显著差异。通常认为大细胞通路对黑白刺激敏感，而小细胞通路对彩色刺激敏感，因此这一结果反映了 DD 的视觉大细胞通路功能缺陷。但是研究者给出了另一种解释：由于该实验任务需要个体在噪音环境中知觉并探测到图形的边界，而黑白刺激相较于彩色刺激更依赖于从噪音中分离信号的能力，若个体的噪音抑制能力低下，那么在该任务中的表现就会受损，因此这一结果恰恰反映了 DD 存在噪音抑制能力

缺陷。

尽管上述研究结果均可以从噪音抑制缺陷角度来解释, 但是目前该领域的研究还存在一些问题。首先, 噪音抑制假设不能够解释以往光栅觉察或朝向判断任务中的结果。以往研究发现阅读障碍在大细胞条件下的光栅对比度敏感性要差于正常阅读者(e.g. Kevan & Pammer, 2008; Slaghuis & Ryan, 1999), 而这些研究所使用的刺激材料均属于无噪音情况。Sperling 等(2005)的研究虽然得出了与之前研究完全相反的结果, 但可能的原因是 Sperling 等(2005)对光栅空间频率的设置(2 c/d)并不符合大细胞通路的敏感条件, 故很难真正探查到大细胞功能。早期对猴子的研究发现, 当损毁大细胞通路后, 对于空间频率低于 1 c/d, 同时时间频率高于 10 Hz 的刺激, 其对比度敏感性有显著性的降低(Merigan, Byrne, & Maunsell, 1991), 说明只有这样的刺激是完全由大细胞通路加工的。而当损毁小细胞通路后, 猴子对空间频率为 2 c/d 刺激的对比度敏感性也降低了(Merigan, Katz, & Maunsell, 1991), 说明空间频率为 2 c/d 的刺激并非完全由大细胞通路加工, 小细胞通路也参与其中。其次, 该假设不能够解释以往整体形状(global form)任务中的结果。以往研究发现 DD 在一致性运动任务中的表现要差于对照组, 但是在整体形状任务中的表现与对照组无差异(Conlon, Sanders, & Wright, 2009)。整体形状任务要求被试判断点阵(或线条)中是否出现了某个固定图形(如圆), 并且实验刺激也是属于高噪音情况。如果 DD 的问题是源自于噪音而非运动, 那么在非运动的整体形状任务中 DD 也应当表现出噪音抑制困难。可见阅读障碍的视觉加工困难究竟反映了视觉大细胞缺陷理论还是噪音抑制缺陷假设这一问题并未完全解决。

2　听觉通道的研究

阅读障碍的噪音抑制缺陷并非是视觉通道特异的, 许多研究发现 DD 在噪音环境下的言语感知(speech in noise)和纯音感知均存在异常。在言语加工方面, Ziegler 等(2009)首先对 DD 的噪音抑制能力进行了考察。他们给被试呈现 VCV (Vowel-Consonant-Vowel)刺激, 要求被试复述听到的音节并记录正确率。结果发现, 在无噪音条件下, DD 的表现与同年龄对照组(chronological age, CA)和同阅读水平对照组(reading level, RL)没有差异; 但是在有噪音条件下, DD 对音节识别的准确率都要低于两个对照组, 表明 DD 存在噪音抑制缺陷并且这种缺陷与其阅读水平低下无关。不过作者认为外部噪音并非是阅读障碍言语知觉缺陷的必要条件, 因为当只呈现去掉了短暂精确结构线索的语音时, DD 仍有较差的表现。之后 Dole 等(2012)也发现了 DD 存在噪音抑制能力的不足, 但是这种能力受到听觉形态的影响, 只有当信号和噪音来自于同一耳朵时 DD 才会表现出噪音抑制缺陷。Calcus 等(2017)认为上述两项研究仅仅考虑到了噪音的能量掩蔽作用, 却并未考虑到噪音的信息掩蔽作用, 因此他们为了进一步考察 DD 的噪音抑制能力, 在研究中同时设置了能量掩蔽和信息掩蔽两种条件。结果发现, 在能量掩蔽的条件下, DD 识别音节的正确率低于 CA 组, 但是和 RL 组没有显著差异; 而在信息掩蔽的条件下, DD 的表现同样差于 CA 组, 但是却好于 RL 组。研究者认为尽管 DD 存在噪音抑制缺陷, 但是这种缺陷可能是由于其阅读能力低下导致的, 也就是说噪音抑制缺陷并非是导致阅读障碍的原因, 而是其结果。

在非言语加工方面, Chait 等(2007)考察了阅读障碍在噪音环境下加工不同频率纯音的能力, 结果发现 DD 识别纯音的准确率显著低于对照组。Partanen 等(2012)使用 fMRI 技术发现了相似的结果。实验让被试被动地听不同频率的纯音, 并设置了三种信噪比水平(0, 1, 10), 结果发现 DD 的左侧赫尔氏回对纯噪音有更大的激活, 而右侧赫尔氏回在信噪比为 1 或 10 的条件下的激活减弱; 右侧颞上沟在高噪音下有更低的激活, 而在低噪音下与对照组没有显著性差异。这两项研究从行为和脑层面都表明 DD 在噪音条件下加工纯音存在困难, 但是由于缺乏纯信号(无噪音)条件的对比, 难以排除 DD 对纯音的感知能力是否有缺陷。

3　噪音抑制与注意的关系

阅读障碍所表现出的这种一般性的噪音抑制缺陷现象究竟反映了怎样的本质? 研究者认为信号增强和噪音抑制是注意优化知觉判断的不同机制: 信号增强涉及到保持加工过程中信号的完整性; 而噪音抑制则涉及到优化知觉过滤, 从而让信号被加工而噪音被排除(Sperling et al., 2006a)。但 DD 在加工时的无效的注意窗口会将目标刺激

暴露在来自时间以及空间的噪音干扰中，从而影响知觉判断，因此有研究者认为 DD 所表现出的知觉噪音抑制缺陷本质上是由注意缺陷导致的(Facoetti et al., 2008)。以往研究的确发现了 DD 存在注意缺陷：他们在加工刺激时不能快速地将注意从一个窗口转移到另一个窗口，表现出较长的注意停留时间，存在注意转换的延迟(sluggish attentional shifting) (Hari & Renvall, 2001)。有效的注意转移对阅读具有十分重要的作用。最初在习得阅读时，个体需要逐个字母地对文字进行解码，这就需要注意在字母间转换。成熟阅读者同样需要注意在文字间进行快速流畅的扫描，以决定当前要加工的内容(Vidyasagar, 2005)。而 DD 的注意转换存在时间与空间上的延迟(e.g. Ruffino et al., 2010; Ruffino, Gori, Boccardi, Molteni, & Facoetti, 2014; Vidyasagar & Pammer, 2010)，并且这种延迟在视觉和听觉通道中都会表现出来(Facoetti et al., 2010)，这最终可能会导致其在阅读任务中有较差的表现。一些研究也发现了 DD 的噪音抑制缺陷会受到注意的调控。Ruffino, Gori, Franceschini 和 Facoetti (2010)采用符号探测与线索范式相结合的实验任务，发现只有在有效的注意线索条件下，DD 才会表现出噪音抑制缺陷; Conlon 等(2012)采用一致性运动任务，在刺激呈现之前出现线索提示信号点的颜色，结果发现在信号点对比度低于噪音点对比度的条件下，线索提示能够显著降低 DD 的阈限，DD 不再表现出噪音抑制缺陷。但是，Ruffino 等人的研究是在目标刺激两侧增加干扰刺激，并且目标刺激并非在中央视野呈现，这样的设置可能更多地反映了视觉拥挤效应(crowding)而非噪音抑制能力，以往研究也发现 DD 表现出了更强烈的视觉拥挤效应(Gori & Facoetti, 2015; Zorzi et al., 2012)，因此该研究可能说明的是注意对视觉拥挤效应的调控作用；而 Conlon 等人的研究则表明 DD 可以利用线索提示通过自上而下的注意调控去易化反应，这说明注意的确能够调控 DD 的知觉噪音抑制能力，但是该研究并不能够证明 DD 存在注意缺陷，因此也不能够证明 DD 的噪音抑制缺陷是由其注意缺陷导致的。

在脑神经层面，额顶网络中的后顶叶皮层(parietal posterior cortex, PPC)是与空间注意有关的重要脑区，而这个脑区被认为是大细胞−背侧通路上的一部分(Saalmann, Pigarev, & Vidyasagar, 2007)，因此有研究者认为阅读障碍的噪音抑制缺陷还是和其视觉大细胞−背侧通路缺陷有着紧密联系，由于视觉大细胞的感受野大且传导速度快，该系统提供了最初的快速的低空间频率信号，并通过背侧通路达到顶叶(Vidyasagar, 2005)，为分割物体的前景(foreground)和背景(backgroud)提供了原始的整体分析，之后反馈信号才会进入颞下获取更多细节信息(Laycock, Alexander, Crewther, & Crewther, 2012)。这说明阅读障碍的大细胞通路缺陷和噪音抑制缺陷并非是完全对立的两个理论假设，它们可能分别反映了阅读障碍者视觉系统加工进程中不同层面的异常。视觉大细胞−背侧通路缺陷理论更多强调了视觉传导通路上不同阶段区域的功能特性异常，而噪音抑制缺陷假设则更多强调了高级皮层对早期视觉加工自上而下的调控异常。这种高级皮层自上而下的调控异常可能不仅影响视觉区域的加工，对听觉区域同样存在作用，因此阅读障碍才会表现出多感觉/一般性的噪音抑制缺陷。

4 汉语研究

汉语是一种语标文字，与拼音文字不同，汉字具有复杂的字形结构，且缺乏明确的形音对应规则。由于汉语具有独特的文字特点，汉语 DD 儿童的许多缺陷表现也与拼音文字有所不同。例如，拼音文字的研究认为语音缺陷是阅读障碍的核心缺陷(Snowling, 2001)，而在汉语的研究中语音技能并非影响阅读的主要因素(Ho, Chan, Lee, Tsang, & Luan, 2004; Zhou et al., 2014)，语素意识缺陷、快速命名缺陷、正字法意识缺陷可能对汉语阅读障碍具有更重要的作用(Chung, Ho, Chan, Tsang, & Lee, 2011; Leong, Loh, Ki, & Tse, 2011; Shu, McBride-Chang, Wu, & Liu, 2006)；不同于拼音文字的研究结果，汉语 DD 的视觉空间注意分布似乎不存在异常的外侧视野优势(田梦雨等, 2016)；在神经机制方面，有研究者发现，有别于拼音文字，汉语 DD 存在左侧小脑缺陷，而非右侧(Yang, Yang, Chen, Zhang, & Bi, 2016; Yang & Bi, 2011; Yang, Bi, Long, & Tao, 2013)等等。目前考察汉语阅读障碍儿童噪音抑制能力的研究还很少，但是关于大细胞通路功能的研究都表明汉语 DD 儿童存在视觉加工困难。Meng 等(2011)发现在一致性运动任务中汉语 DD 儿童的表现差于同

年龄正常儿童, 并且一致性运动敏感性与汉字正字法相似性的判断速度、图片命名准确性、语音意识等阅读技能相关。采用相同范式, Qian 等(2014)也发现汉语 DD 的一致性运动敏感性差于同年龄对照组, 且与正字法意识显著相关。肖茜等人(2014)采用轮廓幻影范式, 发现在黑白点阵条件下汉语 DD 的视觉快速加工能力差于同年龄对照组以及同阅读水平对照组, 且与阅读流畅性和语音意识均相关。研究者认为这些结果反映了汉语 DD 存在视觉大细胞−背侧通路缺陷, 并且这种缺陷并非是由阅读经验缺乏和阅读能力低下导致的。但是按照 Sperling 等人(2006a, 2006b)的观点, 这些研究范式所使用的刺激材料均是在高噪音的情况下, 因此也可以认为这些结果反映了汉语 DD 的噪音抑制缺陷。可见这一问题还有待于进一步研究, 未来应当结合行为层面的研究(如采用光栅觉察任务、一致性运动任务等)与神经层面的研究(如借助 fMRI 技术直接探查外侧膝状体大小细胞层、视觉运动区、后顶叶皮层等区域的功能), 系统检验汉语阅读障碍儿童的视觉加工困难究竟源自于噪音抑制缺陷还是大细胞−背侧通路功能缺陷, 抑或是二者皆有。

5　总结与展望

综上所述, 以往拼音文字的研究发现阅读障碍群体表现出了噪音抑制困难, 并且这种困难不仅在视觉通道中存在, 在听觉通道中也存在, 说明阅读障碍可能具有多感觉/一般性的噪音抑制缺陷。但是, 该领域还有许多问题没有回答清楚, 未来应着重从以下几个方面展开研究。(1)阅读障碍噪音抑制的缺陷本质是什么？究竟是一个独立的固有缺陷, 还是仅仅是一个知觉层面的现象, 可以完全被注意缺陷所解释。(2)噪音抑制假设与大细胞理论的关系。这两种理论假设可能并非完全对立, 可能反映了阅读障碍视觉加工困难的不同侧面, 这些还需要更多研究系统地检验和回答。(3)噪音抑制缺陷究竟是阅读障碍的原因还是结果？目前视觉领域的研究较少涉及到噪音抑制缺陷与阅读能力因果关系的探查, 而在听觉领域一些研究甚至得出了相反的结果, 可见这一问题目前仍不清楚, 未来需要通过设置同阅读水平对照组、早期追踪预测、干预训练等研究手段来进一步考察这一问题。

参考文献

田梦雨, 张熙, 张逸玮, 毕鸿燕. (2016). 汉语发展性阅读障碍儿童的不同视野注意能力. *心理与行为研究*, *14*(3), 289–297.

肖茜, 张逸玮, 赵婧, 毕鸿燕. (2014). 汉语发展性阅读障碍儿童的视觉快速加工能力. *中国心理卫生杂志*, *28*(9), 679–684.

Boets, B., Vandermosten, M., Cornelissen, P., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2011). Coherent motion sensitivity and reading development in the transition from prereading to reading stage. *Child Development*, *82*(3), 854–869. http://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01527.x

Calcus, A., Deltenre, P., Colin, C., & Kolinsky, R. (2017). Peripheral and central contribution to the difficulty of speech in noise perception in dyslexic children. *Developmental Science*, *21*(3), e12558. http://doi.org/10.1111/desc.12558

Chait, M., Eden, G., Poeppel, D., Simon, J. Z., Hill, D. F., & Flowers, D. L. (2007). Delayed detection of tonal targets in background noise in dyslexia. *Brain and Language*, *102*(1), 80–90. http://doi.org/10.1016/j.bandl.2006.07.001

Chung, K. K. H., Ho, C. S. H., Chan, D. W., Tsang, S. M., & Lee, S. H. (2011). Cognitive skills and literacy performance of Chinese adolescents with and without dyslexia. *Reading and Writing*, *24*(7), 835–859. http://doi.org/10.1007/s11145-010-9227-1

Conlon, E. G., Lilleskaret, G., Wright, C. M., & Power, G. F. (2012). The influence of contrast on coherent motion processing in dyslexia. *Neuropsychologia*, *50*(7), 1672–1681. http://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.03.023

Conlon, E. G., Sanders, M. A., & Wright, C. M. (2009). Relationships between global motion and global form processing, practice, cognitive and visual processing in adults with dyslexia or visual discomfort. *Neuropsychologia*, *47*(3), 907–915. http://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.12.037

Conlon, E. G., Sanders, M., & Zapart, S. (2004). Temporal processing in poor adult readers. *Neuropsychologia*, *42*(2), 142–157. http://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.07.004

Dole, M., Hoen, M., & Meunier, F. (2012). Speech-in-noise perception deficit in adults with dyslexia: Effects of background type and listening configuration. *Neuropsychologia*, *50*(7), 1543–1552. http://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.03.007

Facoetti, A., Ruffino, M., Peru, A., Paganoni, P., & Chelazzi, L. (2008). Sluggish engagement and disengagement of non-spatial attention in dyslexic children. *Cortex*, *44*(9),

1221–1233. http://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.10.007

Facoetti, A., Trussardi, A. N., Ruffino, M., Lorusso, M. L., Cattaneo, C., Galli, R., … Zorzi, M. (2010). Multisensory spatial attention deficits are predictive of phonological decoding skills in developmental dyslexia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*(5), 1011–1025. http://doi.org/10.1162/jocn.2009.21232

Gori, S., Cecchini, P., Bigoni, A., Molteni, M., & Facoetti, A. (2014). Magnocellular-dorsal pathway and sub-lexical route in developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*(June), 460. http://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00460

Gori, S., & Facoetti, A. (2015). How the visual aspects can be crucial in reading acquisition: The intriguing case of crowding and developmental dyslexia. *Journal of Vision*, *15*(1), 1–20. http://doi.org/10.1167/15.1.8

Hancock, R., Pugh, K. R., & Hoeft, F. (2017). Neural noise hypothesis of developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, *21*(6), 434–448. http://doi.org/10.1016/j.tics.2017.03.008

Hari, R., & Renvall, H. (2001). Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, *5*(12), 525–532. http://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01801-5

Ho, C. S. H., Chan, D. W. O., Lee, S. H., Tsang, S. M., & Luan, V. H. (2004). Cognitive profiling and preliminary subtyping in Chinese developmental dyslexia. *Cognition*, *91*(1), 43–75. http://doi.org/10.1016/S0010-0277(03)00163-X

Kevan, A., & Pammer, K. (2008). Making the link between dorsal stream sensitivity and reading. *NeuroReport*, *19*(4), 467–470. http://doi.org/10.1097/WNR.0b013e3282f5f7ad

Laycock, R., Alexander, B., Crewther, D., & Crewther, S. (2012). Critical timing of dorsal and ventral visual streams in abrupt and ramped onset object recognition. *Vision Science Society*, *12*(9), 521. http://doi.org/10.1167/12.9.521

Leong, C. K., Loh, K. Y., Ki, W. W., & Tse, S. K. (2011). Enhancing orthographic knowledge helps spelling production in eight-year-old Chinese children at risk for dyslexia. *Annals of Dyslexia*, *61*(1), 136–160. http://doi.org/10.1007/s11881-011-0051-3

Meng, X. Z., Cheng-Lai, A., Zeng, B., Stein, J. F., & Zhou, X. L. (2011). Dynamic visual perception and reading development in Chinese school children. *Annals of Dyslexia*, *61*(2), 161–176. http://doi.org/10.1007/s11881-010-0049-2

Merigan, W. H., Byrne, C. E., & Maunsell, J. H. (1991). Does primate motion perception depend on the magnocellular pathway? *The Journal of Neuroscience*, *11*(11), 3422–3429. Retrieved from http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1941091

Merigan, W. H., Katz, L. M., & Maunsell, J. H. (1991). The effects of parvocellular lateral geniculate lesions on the acuity and contrast sensitivity of macaque monkeys. *The Journal of Neuroscience*, *11*(4), 994–1001. Retrieved from http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2010820

Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (2001). Developmental dyslexia: the cerebellar deficit hypothesis. *Trends in Neurosciences*, *24*(9), 508–511. http://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01896-8

Northway, N., Manahilov, V., & Simpson, W. (2010). Coloured filters improve exclusion of perceptual noise in visually symptomatic dyslexics. *Journal of Research in Reading*, *33*(3), 223–230. http://doi.org/10.1111/j.1467-9817.2009.01409.x

Partanen, M., Fitzpatrick, K., Mädler, B., Edgell, D., Bjornson, B., & Giaschi, D. E. (2012). Cortical basis for dichotic pitch perception in developmental dyslexia. *Brain and Language*, *123*(2), 104–112. http://doi.org/10.1016/j.bandl.2012.09.002

Qian, Y., & Bi, H.-Y. (2014). The visual magnocellular deficit in Chinese-speaking children with developmental dyslexia. *Frontiers in Psychology*, *5*(12), 3627–3633. http://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00692

Ruffino, M., Gori, S., Boccardi, D., Molteni, M., & Facoetti, A. (2014). Spatial and temporal attention in developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, *8*, 331. http://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00331

Ruffino, M., Gori, S., Franceschini, S., & Facoetti, A. (2010). Developmental dyslexia: Perceptual noise exclusion deficit or spatial attention dysfunction? *Perception ECVP Abstract*, *39*, 80–80.

Ruffino, M., Trussardi, A. N., Gori, S., Finzi, A., Giovagnoli, S., Menghini, D., … Facoetti, A. (2010). Attentional engagement deficits in dyslexic children. *Neuropsychologia*, *48*(13), 3793–3801. http://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.09.002

Saalmann, Y. B., Pigarev, I. N., & Vidyasagar, T. R. (2007). Neural mechanisms of visual attention: How top-down feedback highlights relevant locations. *Science*, *316*(5831), 1612–1615. http://doi.org/10.1126/science.1139140

Shu, H., McBride-Chang, C., Wu, S., & Liu, H. (2006). Understanding Chinese developmental dyslexia: Morphological awareness as a core cognitive construct. *Journal of Educational Psychology*, *98*(1), 122–133. http://doi.org/10.1037/0022-0663.98.1.122

Skottun, B. C. (2000). The magnocellular deficit theory of dyslexia: The evidence from contrast sensitivity. *Vision Research*, *40*(1), 111–127. http://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00170-4

Slaghuis, W. L., & Ryan, J. F. (1999). Spatio-temporal

contrast sensitivity, coherent motion, and visible persistence in developmental dyslexia. *Vision Research*, *39*(3), 651–668. http://doi.org/10.1016/S0042-6989(98)00151-5

Snowling, M. J. (2001). From language to reading and dyslexia. *Dyslexia*, *7*(1), 37–46. http://doi.org/10.1002/dys.185

Sperling, A. J., Lu, Z. L., Manis, F. R., & Seidenberg, M. S. (2005). Deficits in perceptual noise exclusion in developmental dyslexia. *Nature Neuroscience*, *8*(7), 862–863. http://doi.org/10.1038/nn1474

Sperling, A. J., Lu, Z. L., Manis, F. R., & Seidenberg, M. S. (2006a). Motion-perception deficits and reading impairment: It's the noise, not the motion. *Psychological Science*, *17*(12), 1047–1053. http://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01825.x

Sperling, A. J., Lu, Z. L., Manis, F. R., & Seidenberg, M. S. (2006b). Deficits in achromatic phantom contour perception in poor readers. *Neuropsychologia*, *44*(10), 1900–1908. http://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.02.003

Stein, J. (2001). The magnocellular theory of developmental dyslexia. *Dyslexia*, *7*(1), 12–36. http://doi.org/10.1002/dys.186

Stein, J. (2014). Dyslexia: The role of vision and visual attention. *Current Developmental Disorders Reports*, *1*(4), 267–280. http://doi.org/10.1007/s40474-014-0030-6

Stein, J., & Walsh, V. (1997). To see but not to read; the magnocellular theory of dyslexia. *Trends in Neurosciences*, *20*(4), 147–152. http://doi.org/10.1016/S0166-2236(96)01005-3

Talcott, J. B., Gram, A., Van Ingelghem, M., Witton, C., Stein, J. F., & Toennessen, F. E. (2003). Impaired sensitivity to dynamic stimuli in poor readers of a regular orthography. *Brain and Language*, *87*(2), 259–266. http://doi.org/10.1016/S0093-934X (03)00105-6

Tallal, P. (2004). Improving language and literacy is a matter of time. *Nature Reviews. Neuroscience*, *5*(9), 721–728. http://doi.org/10.1038/nrn1499

Vidyasagar, T. R. (2005). Attentional gating in primary visual cortex: A physiological basis for dyslexia. *Perception*, *34*(8), 903–911. http://doi.org/10.1068/p5332

Vidyasagar, T. R., & Pammer, K. (2010). Dyslexia: A deficit in visuo-spatial attention, not in phonological processing. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(2), 57–63. http://doi.org/10.1016/j.tics.2009.12.003

Winterer, G., & Weinberger, D. R. (2004). Genes, dopamine and cortical signal-to-noise ratio in schizophrenia. *Trends in Neurosciences*, *27*(11), 683–690. http://doi.org/10.1016/j.tins.2004.08.002

World Health Organization. (2011). *International statistical classification of diseases and related health problems - 10th revision, 4th ed*. World Health Organization, Geneva.

Yang, Y., & Bi, H. Y. (2011). Unilateral implicit motor learning deficit in developmental dyslexia. *International Journal of Psychology*, *46*(1), 1–8. http://doi.org/10.1080/00207594.2010.509800

Yang, Y. H., Yang, Y., Chen, B. G., Zhang, Y. W., & Bi, H. Y. (2016). Anomalous cerebellar anatomy in Chinese children with dyslexia. *Frontiers in Psychology*, *7*(March), 1–9. http://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00324

Yang, Y., Bi, H. Y., Long, Z. Y., & Tao, S. (2013). Evidence for cerebellar dysfunction in Chinese children with developmental dyslexia: an fMRI study. *The International Journal of Neuroscience*, *123*(5), 300–10. http://doi.org/10.3109/00207454.2012.756484

Zhou, Y. L., McBride-Chang, C., Law, A. B. Y., Li, T., Cheung, A. C. Y., Wong, A. M. Y., & Shu, H. (2014). Development of reading-related skills in Chinese and English among Hong Kong Chinese children with and without dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, *122*, 75–91. http://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.12.003

Ziegler, J. C., Pech-Georgel, C., George, F., & Lorenzi, C. (2009). Speech-perception-in-noise deficits in dyslexia. *Developmental Science*, *12*(5), 732–745. http://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00817.x

Zorzi, M., Barbiero, C., Facoetti, A., Lonciari, I., Carrozzi, M., Montico, M., … Ziegler, J. C. (2012). Extra-large letter spacing improves reading in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(28), 11455–11459. http://doi.org/10.1073/pnas.1205566109

The noise exclusion deficit in developmental dyslexia

JI Yuzhu; BI Hongyan

(*Center for Brain Science and Learning Difficulties, CAS Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*) (*Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: The nature of cognitive and neurophysiological deficits of dyslexia have been under debate for a long time. Recently, a new hypothesis for developmental dyslexia —— noise exclusion deficit hypothesis, was proposed and was supported by a number of empirical research evidence from alphabetic languages. It has been found that dyslexia exhibited noise exclusion deficits not only in visual domain but also in auditory domain, indicating a multisensory or domain-general noise exclusion deficit. Alternatively, noise exclusion deficit of dyslexia was also argued to be mainly derived from attention deficit. Yet, some critical issues are still required to be addressed in the future, such as whether noise exclusion deficit presents in Chinese developmental dyslexia.

Key words: developmental dyslexia; noise exclusion; visual magnocellular-dorsal pathway; attention